養液栽培技術講習會專刊　第三輯　14～26，1990

培養液之理論與實際

王銀波　吳正宗*

一、培養液的組成成分

植物所需的基本營養要素有16種，其中碳、氫、氧來自水和空氣，其餘13種則需由培養液供應。氯極易自水、空氣及鹽類不純物中供應，除了特殊需氯作物之外，培養液中不易缺乏，所以在培養液組成成分內，無需格外考慮。其他12種要素在培養液中之絕對量、相對量及存在形態都是培養液之組成成分所必需注意的。

實際水耕栽培的理想培養液，必需具備易被作物根吸收之形態及滿足植物生長所需之平衡量，因此，需具下列四項條件：

1. 水耕液在生長期中之 pH 必需穩定，如此可以確保養分以可利用之離子形態存在，不致沈澱不溶解。
2. 各元素在生長期中維持既定比例或近於既定比例，以供應作物平衡之營養素。
3. 生長期間培養液之修補簡單容易，以配合各階段植物生長所需要　。
4. 養液之貯藏保存期間穩定，不致因貯存而發生沈澱、揮散等減少原有之成分含量。

為了達到上述目的，可以從其成分之形態、各離子比例、養分肥料之資材加以考慮。

能與作物營養特性配合的培養液配方，並非僅限於培養期間 pH 值、組成成分與濃度變化較少，尚需具備增加單位產量，提高產品品質及減少單位產量成本之優點，方為一最佳的培養液配方。

二、本省常用的培養液肥料及肥料配方

培養液用肥料的選用必需從其所能提供的養分形態及價格來考量，日本最常用的肥料及其價格如表一。本省常用的肥料及其價格如表二。

表一中多量元素中括弧硝酸銨為增加氮濃度所用，微量元素括弧內之硫酸鋅、硫酸銅與鉬酸鈉使用井水時一般可以不加。

表一　日本最常用養液栽培肥料

多量元素肥料	微量元素肥料
硝酸鈣	（硫酸鋅）
（硝酸銨）	（硫酸銅）
第一磷酸銨	硼酸
硝酸鉀	EDTA—鐵
硫酸鎂	氯化錳
	（鉬酸鈉）

* 國立中興大學土壤學系教授及助教

表二 本省常用的養液栽培肥料及其特性

肥料種類	所能提供肥料的形態	價格（元／公斤）
$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	Ca^{2+}、NO_3^-	50
$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	Ca^{2+}、Cl^-	12
NH_4NO_3	NH_4^+、NO_3^-	31
$(NH_4)_2SO_4$	NH_4^+、SO_4^{2-}	10
$NH_4H_2PO_4$	NH_4^+、$H_2PO_4^-$	72
KH_2PO_4	K^+、$H_2PO_4^-$	64
KCl	K^+、Cl^-	10
KNO_3	K^+、NO_3^-	30
K_2SO_4	K^+、SO_4^{2-}	31
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	Mg^{2+}、SO_4^{2-}	12
$MgCl_2$	Mg^{2+}、Cl^-	22
$MnSO_4$	Mn^{2+}、SO_4^{2-}	50
$ZnSo_4$	Zn^{2+}、SO_4^{2-}	33
$CuSO_4$	Cu^{2+}、SO_4^{2-}	39
H_3BO_3	H_3BO_3	49
$FeSO_4$	Fe^{2+}、SO_4^{2-}	16
EDTA－Fe	EDTA、Fe^{2+}	

本省各研究機構常用配方成分如表三、四、五、六。

表三 中興大學夏季小白菜水耕液配方（吳，1989）

	元素	使用肥料	濃度（ppm）
A液	Ca, N	$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	40, 28
	Ca	$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	40
	Fe	EDTA-Fe	2
	N	NH_4NO_3	40
B液	K, P	KH_2PO_4	13, 10
	K	K_2SO_4，KCl	65（39, 26）
	Mg	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	36
	Mn	$MnSO_4 \cdot 4H_2O$	1
	B	H_3BO_3	0.5
	Zn	$ZnSO_4 \cdot 5H_2O$	0.2
	Cu	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	0.05
	Mo	$(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 2H_2O$	0.005
	S		64
	Cl		95

表四 鳳山熱帶園藝試驗分所使用配方（沈，1987）（g／1000ℓ）

培養液處方		硝酸鉀	硝酸鈣	硫酸鎂	第一磷酸銨	EDTA鐵	成分濃度（me／l）					電導度（mS／cm）
							NO_3-N	K	Ca	P	Mg	
福格蘭 I		1010	710	500	230	20	16	10	6	6	4	2.6
福格蘭 II		610	950	500	120	20	14	6	8	3	4	2.4
日本園試		810	950	500	155	20	16	8	8	4	4	2.4
山崎處方	胡瓜	610	830	500	120	20	13	6	7	3	4	2.0
	洋香瓜	610	830	380	155	20	13	6	7	4	3	2.0
	西瓜	610	830	185	60	20	13	6	7	1.5	1.5	1.6
	菠菜	300	470	250	80	20	7	3	4	2	2	1.1
	番茄	400	360	250	80	20	7	4	3	2	2	1.1
	草莓	310	240	125	60	20	5	3	2	1.5	1	0.7
	甜椒	610	360	250	100	20	9	6	3	2.5	2	1.3
	茄	710	360	250	120	20	10	7	3	3	2	1.5
	萵苣	400	240	125	60	20	6	4	2	1.5	1	0.8
	茼蒿	810	470	500	155	20	12	8	4	4	4	2.0
	蕪菁	510	240	125	60	20	7	5	2	1.5	1	0.9
	鴨兒芹	710	240	250	190	20	9	7	2	5	2	1.6
	康乃馨	400	590	310	80	20	9	4	5	2	2.5	1.3
	玫瑰花	300	360	150	60	20	10	3	3	1.5	1.2	1.3
	火鶴花	200	240	200	30	20	4	2	2	0.8	1.6	0.6
	秋菊	400	240	125	80	20	8	4	2	2	1	1.1
	柑桔	200	470	185	60	20	6	2	4	1.5	1.5	0.9

微量要素的配製

鹽類	10公升
硼酸	300公克
硫酸錳	200公克
硫酸鋅	22公克
硫酸銅	5公克
鉬酸鈉	2公克
硫酸	10毫升

每1000公升培養液內，加入上述濃縮液100ml。

表五 台中區農業改良場葉菜類水耕營養液基本配方（高，1987）

	營養液名稱	用量mg／ℓ
巨量元素	硝酸鈣（$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$）	236
	硝酸鉀（KNO_3）	404
	硫酸鎂（$MgSO_4 \cdot 7H_2O$）	123
	磷酸一銨（$NH_4H_2PO_4$）	57
微量元素	Fe-EDTA	29
	硼酸（H_3BO_3）	1.2
	氯化錳（$MnCl_2 \cdot 4H_2O$）	0.72
	硫酸銅（$CuSO_4 \cdot 5H_2O$）	0.04
	硫酸鋅（$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$）	0.09
	鉬酸鈉（$Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$）	0.01

表六 台灣大學山地農場所採用配方（張，1988）

	1號肥料	2號肥料						微量元素			
	硝酸鈣	氮	磷	鉀	鎂	錳	硼	鐵	銅	鋅	鉬
含量%	11	10	8	20	5	0.1	0.1	0.18	0.04	0.08	0.04

另外本省常以地下水做為水耕液用水，地下水中所含離子會影響作物的栽培，以中興大學為例，其地下水水質分析如表七，由表七可以發現水質中鈣與鎂之存在量不容忽視，故必需在肥料鹽中酌減，以免影響水耕液配方中必需離子的平衡。通常地下水質之 EC 値在0.2 mS／cm 以下很好，可以使用，0.5 mS／cm 以下則應注意其內所含成分，更高則不宜使用。

表七 夏季中興大學地下水水質分析表（吳，1989）

pH	EC	NH_4^+-N	NO_3^--N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Mo	S	Cl	Na
	mS／cm	ppm													
7.1	0.34	0.9	6.0	0.1	2.6	25.5	13.8	0.04	0	0.14	0.02	0	14	7.5	2.0

三、培養液組成成分的理論

(一)培養液組成成分組合目的

培養液因各種作物不同，需要的濃度、各種離子的比例及需要的形態等之組成成分不同，而大不相同。培養液之組成成分依據作物品種外，栽培方法、栽培季節、成長階段及周圍環境條件（包括日照及溫度）來選用適當組成成分的培養液，以利於作物生長最佳、產量最高、品質最好。

(二)培養液組成成分的決定方式

決定培養液的組成成分時，可採取若干不同的方法，惟至少需經過以下兩項程序，其一，針對能正常成長及收穫量較高的作物植體進行分析，以查出該作物所需吸收之元素的正確需求量。

依據其吸收量，雖可了解植物所需吸取的離子比例與各個離子的總量，然而，對於其與吸水量間之關係，以及培養液中各個離子的濃度，卻無從決定。從事無土栽培時，經常調查培養液中逐漸減少的液量與離子含量，依據各類離子間的比例及各個離子的總量，以決定各種離子被吸取的濃度。其二，依據調查結果，做為基本資料。利用各種不同之總離子濃度及離子間比率的培養液從事栽培，依據實際栽培結果，以決定何種組成最為恰當。目前對培養液組成大體循下列三項標準，從事研究與調整。

1.就各個離子之不同比率配合，觀察其實際栽培結果，成長狀況是否良好，而採用收量最佳的配方，作為組成成分。日本園藝試驗場配方及 Steiner 培養液，均係利用此方式決定的。
2.針對各個作物詳細調查其對營養液的吸取量，然後，依據其吸收情形決定組成成分，再配合實際栽培時的成長狀況與收穫量等，決定其組成成分。山崎的番茄配方，即依據此項方式訂定的。
3.使吸取較多的離子比率積極提高，吸取較少者的比率降低，做為培養液的組成成分。神奈川園試處方，即係依據此方式所訂定的。

此外，尚與培養液是否一再使用、培養液的更新頻度、培養液分析的頻度、組成成分紊亂後是否執行補償等有關，故應小心使自己的培養液維持在適當的濃度與比例。

㈢三種培養液配方之組成理論

1.日本園試標準配方是根據作物對要素之吸收量所決定的，即經由植體分析得知每株作物所吸收的要素量來決定配方，以胡瓜為例，詳如表八。

表八 日本園試標準配方組成濃度之決定方式

	N	P	K	Ca	Mg	S
每株胡瓜吸收成分量 (g)	6	1.1	8.3	4.3	1.2	0.33
換算成要素之毫克當量 (meq)	430	103	213	215	100	20
配製水耕液以鉀為 8 me／ℓ 時其他要素之值（me／ℓ）	16	3.9	8	8	3.8	0.8

由表八所決定的園試配方是根據作物吸收肥料比例大致與植體分析比例相同的構想所決定的，但實際栽培結果，不同作物的吸收量及其比例並非完全一定，特別是番茄，以此培養液栽培時，在高溫易缺鈣而嚴重發生頂腐病，所以在栽培番茄時應提高鈣的濃度。

2.山崎蔬果配方係根據園試配方為基礎，以吸收濃度（n／w 值）來決定培養液的內含物，即吸收的元素量與吸收的水量之比。其決定方式以草莓為例，如表九。其他蔬果之試驗結果如表十。以此吸收成分比所組成的培養液在作物生長的整個過程中，如其濃度降低時，其組成成分的比例也以同樣比例下降，所以欲以追肥回復其原有之濃度也較簡單，即養分的添加修補較容易。
3.Steiner 培養液係以陽離子（Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}）之當量及相近於陰離子（NO_3^-, PO_4^{3-}, SO_4^{2-}）之當量和為前提，而各陰陽離子間之比值則係根據植體分析之比值而訂定的，訂定再根據實際栽培結果求得最適濃度，其適當範圍如圖一。根據 Steiner（1980）試驗結果陽離子之比值為 K^+：Ca^{2+}：Mg^{2+}＝45：35：20，陰離子之比值為 NO_3^-：$H_2PO_4^-$：SO_4^{2-}＝60：5：35時最為恰當。

表九　草莓開花前後 n／w 值之測定　　（山崎，1984）

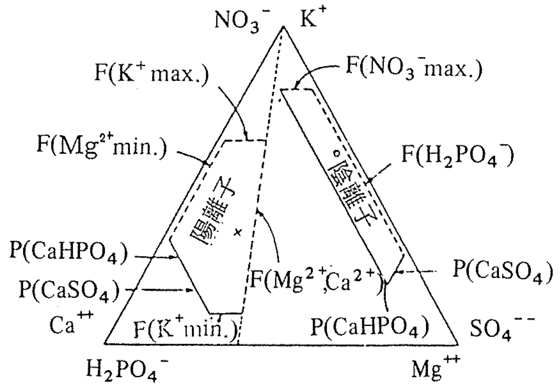
處理濃度	(me／ℓ)	測定事項	水量(ℓ) 前期	水量(ℓ) 後期	測定事項	NO_3—N 前期	NO_3—N 後期	K 前期	K 後期	Ca 前期	Ca 後期	PO_4^{3-}-P 前期	PO_4^{3-}-P 後期	Mg 前期	Mg 後期
NO_3^--N	8	a	10	10	y	8.10	8.20	4.41	4.80	3.98	3.82	1.82	2.01	2.11	2.03
NH_4^+-N	0.65														
K	4	w	2.3	2.7	y_1	8.99	8.10	4.99	4.54	4.60	4.04	1.93	1.68	2.40	2.14
Ca	4														
PO_4^{3-}-P	2														
Mg	2				n／w	5.12	8.47	2.47	5.50	1.90	3.85	1.48	2.30	1.14	1.74
SO_4^{2-}-S	2														

註：a＝總水量，w＝吸水量，y＝起始濃度，y_1＝測定時濃度，n＝養分吸收量

$$n／w＝植物吸收濃度＝\frac{ay-(a-w)y_1}{w}$$

表十　常見蔬果之吸收養分之濃度（n／w 值）（me／ℓ）（山崎，1984）

作　物	NO_3^--N	NH_4^+-N	K	Ca	Mg	PO_4^{3-}-P
洋香瓜	13	4	6	7	3	4
黃　瓜	13	3	6	7	4	3
番　茄	7	2	4	3	2	2
草　莓	5	1.5	3	2	1	1.5
甜　椒	9	2.5	6	3	1.5	2.5
萵　苣	6	1.5	4	2	1	1.5
春　菊	12	4	8	4	4	4
茄　子	10	3	7	3	2	3
小蕪菁	7	1.5	5	2	1	1.5
芹　菜	9	5	7	2	2	5



圖一　於0.7大氣壓、pH6.5之狀態下，各個陰離子與各個陽離子之比值的適當範圍（Steiner, 1984）

P 為產生沈澱的界限，F 為生理的界限

㈣氮源形態對水耕栽培的貢獻

早期的培養液以 NO_3^--N 為主要的氮源，但事實証明併用部分 NH_4^+-N 則不論何種作物，均可以得到較佳的結果，但 NH_4^+-N 與 NO_3^--N 之間的比值究竟如何才可以得到最佳的結果，則各種作物並不一致。依據池田及大澤二人，就20種不同的蔬菜幼苗，在 NO_3^--N 與 NH_4^+-N 二者相同濃度的條件下，調查其優先吸收狀態時所獲得的結果，如表十一

表十一蔬菜在不同 pH 值下對不同氮源的吸收特性（池田、大澤，1981）

pH	優先吸收 NH_4^+-N	優先吸收 NO_3^--N	NH_4^+-N 與 NO_3^--N 二者吸收大致相同者
5	玉米、萵苣 草莓、芹菜 香瓜、水芹菜 黃瓜、鴨兒芹 茼蒿	豌豆、菠菜 西瓜、白菜 菜豆、甘藍 番茄、小蕪菁 甜椒	茄子 青豆
7	玉米、萵苣 草莓、芹菜 香瓜、水芹菜 黃瓜、茼蒿 青豆、鴨兒芹 甜椒、茄子	菠菜 白菜 小蕪菁	菜豆 甘藍 豌豆 番茄 西瓜

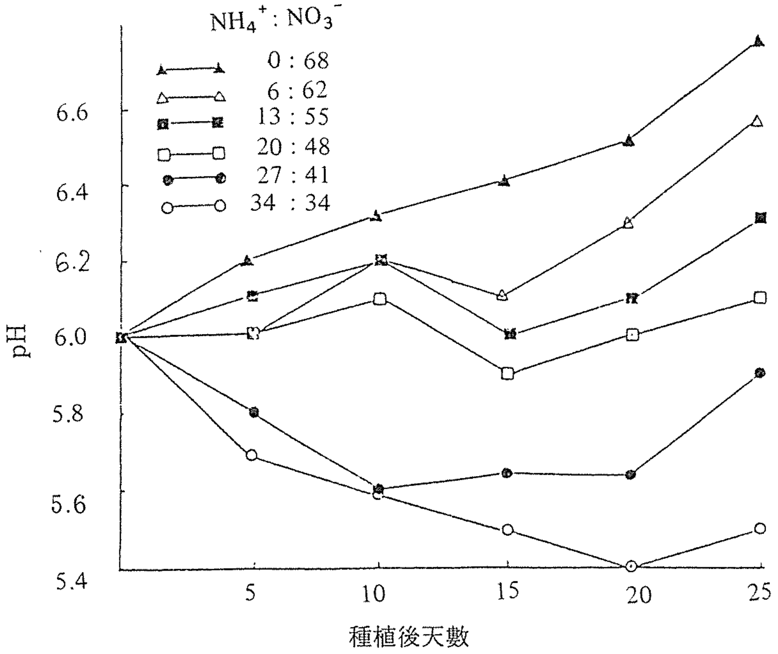
由表十一可知一般白菜、菠菜等優先吸收硝酸態氮，而玉米、草莓、黃瓜、香瓜、萵苣、芹菜等優先吸收銨態氮。

一般培養液之 pH 值，以 NO_3^--N 作為氮的供應源時，呈現 pH 值上升的傾向；以 NH_4^+-N 做為氮的供應源時，則呈現顯著降低傾向。培養液中之 pH 值的變化，雖然並非僅受此施加之氮形態的影響，同時亦受作物種類的影響。改變培養液中 NO_3^--N 與 NH_4^+-N 之比例，實施水耕栽培的結果，對白菜、菠菜等優先吸收 NO_3^--N 之作物而言，培養液中可以容許較高量的 NH_4^+-N 存在，因為當白菜等吸收多量 NO_3^--N 後，易使培養液 pH 值提高，只有培養液內多量 NH_4^+-N 的存在，才可以維持 pH 值的穩定，根據吳（1989）小白菜試驗結果，NO_3^--N ：NH_4^+-N ＝48 ppm：20 ppm 可得良好結果。然對黃瓜與萵苣而言，因其為優先吸收 NH_4^+-N 的作物，培養液中僅少量 NH_4^+-N 之存在便會使 pH 值降低，故其培養液中 NH_4^+-N 的用量就不宜太高。

通常培養液中 NO_3^--N 與葉片中之濃度成正比，培養液中 NO_3^--N 的濃度愈高，則葉片中之濃度亦愈高，如表十二。為使葉片中 NO_3^--N 濃度降低，最重要的莫過使培養液中的 NO_3^--N 濃度降低。此外，與 NH_4^+-N 併用亦能收到效果，白菜與菠菜為優先吸收 NO_3^--N 強烈傾向的蔬菜，此類蔬菜即使與 NH_4^+-N 併用，葉片中所含之 NO_3^--N 濃度，亦不致降低太多，但併用 NH_4^+-N 確可使 pH 值穩定，如圖二，pH 值如果穩定，對於其他養分的控制較為容易。萵苣則不同，係優先吸收 NH_4^+-N 的蔬菜，當併用少量 NH_4^+-N 時，其葉片中 NO_3^--N 濃度降低的效果相當明顯。

表十二　培養液中 NO_3^--N 與 NH_4^+-N 的濃度及其比例對蔬菜葉片中 NO_3^--N 濃度的影響（乾物%）（池田、大澤，1983）

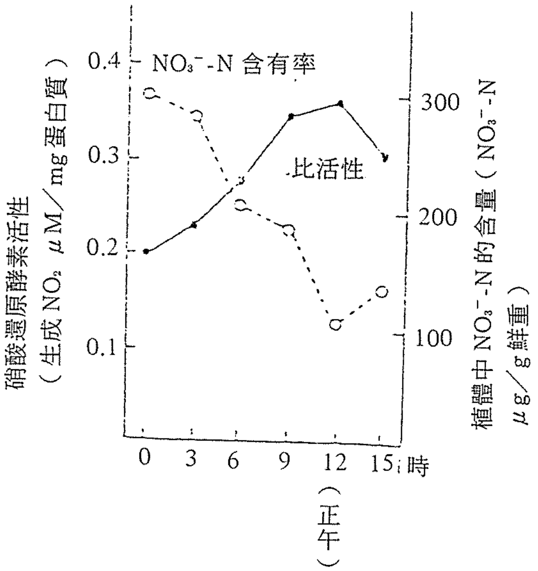
NO_3^- : NH_4^+ 當量比		萵苣	白菜	菠菜	小蕪菁
3.0	0	1.62	1.77	0.96	1.08
2.5	0.5	1.42	1.88	0.77	1.07
2.0	1.0	1.01	1.95	0.68	0.69
1.5	1.5	0.72	1.37	0.37	0.79
1.0	2.0	0.59	1.02	0.21	0.56
0.5	2.5	0.26	0.51	0.10	0.20
0	3.0	tr	tr	tr	tr
12	0	1.66	2.10	1.39	2.27
10	2	0.93	2.64	1.08	2.16
8	4	0.99	2.70	1.22	1.98
6	6	0.90	2.25	1.24	1.95
4	8	0.72	2.12	0.99	1.84
2	10	0.64	1.62	0.58	0.92
0	12	tr	tr	tr	tr



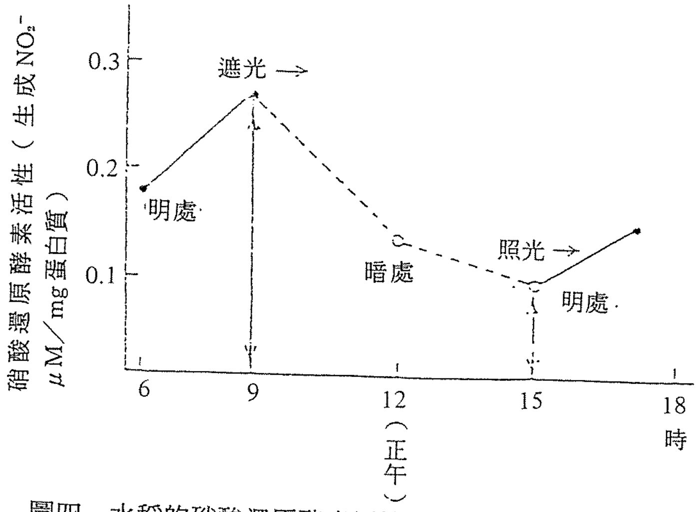
圖二　不同氮源比例對小白菜生長期中 pH 值的影響（吳，1989）

培養液中，即使施用濃度極高的 NO_3^--N，亦不致對作物生長形成障礙，若單獨使用 NH_4^+-N 時即使濃度較 NO_3^--N 低出甚多，仍易對作物生長造成不良影響；另一方面，植物內已含有 NO_3^--N，若未經過還原成為 NH_4^+-N 時，亦無法成為同化物質，而且，此項過程需要能量，

NH_4^+-N 則不同，可直接同化，因此，就氮的供應源而言，NH_4^+-N 實優於 NO_3^--N 。根據柴田等（1969）的水稻試驗指出，NO_3^--N 還原酵素的活性，對光具有強烈的依存性，如圖三、四，當光度強時（中午時分）酵素的活性高，NO_3^--N 在植體內累積的量少，故在自然環境下，夜間植體內累積多量的 NO_3^--N，白晝照光，則 NO_3^--N 急速還原銨化而減少，所以採收作物以選擇在傍晚時為宜，避免植物體內累積大量 NO_3^--N 而影響人類食用的安全性。由上述可知，弱光下 NO_3^--N 之還原較差，所以在弱光下，提供適量 NH_4^+-N 的供應，產量增加較顯著，位田、永井二位專家以鴨兒芹試驗結果如表十三。



圖三　水稻體內 NO_3^--N 含量與硝酸還原酵素活性的關係（柴田等，1969）



圖四　水稻的硝酸還原酵素活性 對光照處理的影響（柴田等，1969）

表十三　不同氮源比例與日照強度對鴨兒芹產量的影響（位田、永井，1981）（克）

NO_3^--N：NH_4^+-N (me／l)	日照強度 Lux 12000 產量	12000 相對百分率	6000 產量	6000 相對百分率	3000 產量	3000 相對百分率
10：0	9.80	100	8.14	100	6.42	100
6：4	9.99	101	10.02	123	8.93	139
5：5	11.94	121	10.10	124	8.89	138
4：6	12.59	128	10.28	126	9.00	140
2：8	10.14	103	9.79	120	5.73	89

根據上述分析，適量的併用 NH_4^+-N 確有優點：

1.可幫忙維持生長期中養液 pH 值的穩定；

2.降低 NO_3^--N 在植體內的累積量，使品質提高；

3.增加葉片翠綠的顏色，葱的葉片不易折斷；

4.使作物產量增加。

所以，針對各種作物，不同季節、不同生長期間對培養液做適度的調整，可以得到上述四項效果。

㈤適度調整培養液的必要性

各項離子之適當濃度，因植物類別、成長階段、氣象條件、作物型態、固體培養基的有無、性質以及培養液供應方法等的不同，而有差異。若栽培時間較長，培養液的組成成分發生顯著變化時，通常農戶會於每作期間內，實施培養液的部分或全部換新。培養液組成成分發生變化的原因，大多因其組成成分未能與該作物的個別營養吸收特性符合所導致的。作物的營養特性，不僅因種類的不同而有差異，且因栽培時間的長短而有變化，若為果菜類，因開花前的營養生長期，以及開花後的生殖生長期，成長階段的不同，其營養特性亦有差異，因此，必需設計適合不同作物，不同生長階段的培養液配方，如此才可確保產能的穩定。如表三、四、五、六、八、九、十即為各種不同作物，經各專家研究所提出適合各該作物的培養液配方。其中表九為山崎以草莓利用不同 n／w 值所得不同生長期使用不同的培養液配方，由表九結果可知草莓生長末期需要添加多量的養分，尤其是鉀與磷的補充更為重要。

四、培養液的實務

在台灣栽培蔬菜最大的困難在於夏季，其水耕液中溶氧量不足，所以栽培實務僅就此加以討論。

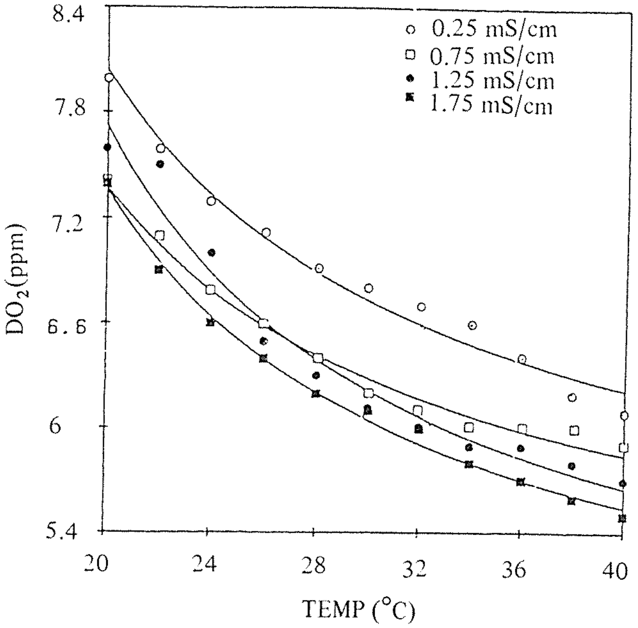
台灣年平均溫度都在10℃以上，在10℃以下出現只有在寒流來襲的晚上，白天極少，因此，栽培各種作物寒害之發生極少，設施裡溫度較外面高，受害尤少，但在夏季則溫度高，設施裡更高，在從事水耕栽培時，由於溫度太高會引起溶氧量不足，在長期缺乏氧氣的情形下作物根部的生長會衰退褐變而死亡，因此，夏季水耕栽培最大的挑戰便在於如何提高培養液的溶氧量。通常增加溶氧量的方法很多，有遮陰、冷水牆、通風等設施以降低氣液溫，間接達到增加溶氧的目的，亦有以循環、增設打氣機等直接增加溶氧的措施，但前述方法花費頗巨，運轉亦需費用，除上述方法外，茲列舉數項花費低廉，運轉不需費用的增加溶氧措施。

1.利用土溫來降低液溫：

此係將養液栽培槽埋置於地面下20公分，由於土壤的絕緣作用可使液溫變化變小，在夏季氣溫高的狀況下，液溫不致升高太多，如此可以增加溶氧。

2.降低培養液濃度來增加溶氧：

作物在高溫時呼吸旺盛，蒸散增強，對氧氣及水分的需求自然增加，此時若不降低溫度增加溶氧或降低培養液電導度增加水分供給，則植株將會因吸水不及而有枯萎現象，吳（1989）的夏季小白菜試驗顯示，當液溫達38℃時，將電導度調低至0.75 mS／cm，則小白菜之暫時凋萎時間將縮短，此顯然係因低濃度下水分調節所奏效，此與培養液中溶氧增加亦有關係，試驗証明每降低電導度0.25 mS／cm，約可增加溶氧量0.1 ppm，如圖五。



圖五　不同溫度與濃度下水耕液的溶氧量（吳，1989）

3.利用水位調節以訓練根系：

根據位田的試驗，氧氣的供給不只是由培養液中供給，也可由空氣中補給，如果將6克的根，歷經兩小時，從水中和空氣中對氧的吸收量比較如表十四，根據結果顯示空氣中補給氧氣的效果是從水中供給氧的兩倍以上，所以根的曝氣是很重要的，但根系之曝氣必需在不影響水分吸收的前提下為之，吳（1989）試驗觀察結果小白菜地上部每生長5公分，水位可下降1公分，如此可增加小白菜對氧氣的吸收。

Imai（1986）試驗指出根系是可以訓練的。此地所謂的根系訓練有別於土壤中根系的伸展、延長，而是指將根系訓練成不同功能的根，理論上將根系訓練分成吸收養分的根，吸收水分的根及呼吸的根，其中呼吸的根可經由水位的調節而訓練出來，只要根基部水分呈飽和狀態，根毛就會出現，根毛一旦發生則可以解決水中氧氣不足的問題，但在管理上，此部分根只能在溼潤的空氣中生存，乾燥的環境不能存活，並且浸水會使其腐爛，故管理要點即水位只能下降而不能上升。

表十四　從水中和空氣中吸收氧氣量的比較（位田，1974）

種類	氣壓 mm	溫度℃	從水中吸收的氧氣量（mg）	從空氣中吸收的氧氣量（mg）	比　率（空氣中／水中）
茄子	764	23	0.84	1.71	2.03
	764	23	0.96	2.14	2.22
	760	25	1.20	2.56	2.13
番茄	768	28	1.64	4.00	2.43
	762	26	1.56	3.65	2.34
	762	23	1.38	3.40	2.46

圖六　溶氧不足根系有褐變及根毛生成情形

圖七　溶氧充足根系白皙，幾乎沒有根毛

參考文獻

1. 山崎肯哉 1984 養液栽培全編 博文社 日本。
2. 土岐知久 1986 NFT 水耕栽培の實際 農業および園藝 61(1)：135-146。
3. 王銀波 1989 培養液的化學性及其管理 養液栽培技術講習會專刊第二輯 鳳山熱帶園藝試驗分所 60-68。
4. 池田英男 1986 作物の榮養特性からみを培養液管理 農業および園藝 61(1)：205-211。
5. 宇田川雄二 1986 NFT 水耕栽培の實際 農業および園藝 61(1)：135-146。
6. 竹下純則 1974 培養液管理の實際と改善點 野菜の養液栽培 農耕と園藝 71-75。
7. 吳正宗 1989 夏季小白菜水耕液配方及管理技術之研擬 國立中興大學碩士論文。
8. 佐佐木皓二 1986 循環式水耕栽培の實際 農業および園藝 61(1)：122-128。
9. 位田藤久太郎 1974 溶存酸素の管理 野菜の養液栽培 農耕と園藝 28-31。
10. 沈再發 1987 葉菜類浮根式水耕栽培 豐年37(1)：31-33。
11. 並木隆和 1986 培養液組成の理論と實際 農業および園藝 61(1)：197-204。
12. 板木利隆 1986 循環式水耕栽培の理論 農業および園藝 61(1)：115-121。
13. 高德錚 1988 動態浮根式葉菜水耕栽培技術 養液栽培技術講習會專刊第一輯 鳳山熱帶園藝試驗分所 42-49。
14. 高橋英一 1974 比較植物營養學。
15. 張國珍 1988 NFT 養液薄膜栽培 養液栽培技術講習專刊第一輯 鳳山熱帶園藝試驗分所 31-41。
16. Imai, H. 1986. AVRDC noncirculation hydroponic system. AVRDC, ROC.
17. John, J.B. 1983. A Guide for the Hydroponic Soilless Culture Grower. Timber Press, U.S.A.
18. Resh, H.M. 1985. Hydroponic Food Production. Woodbridge Press Publishing Co., U.S.A.